

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18500230

研究課題名（和文） 情動の評価・誘因と動的記憶の融合による大脳辺縁系の数理モデル及びその応用

研究課題名（英文） A Study of Limbic System Model Fusing Emotion Evaluation and Dynamic Association Memory and Its Application

研究代表者

呉本 堯（KUREMOTO TAKASHI）

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40294657

## 研究成果の概要：

本研究では情動の評価・誘因要素と動的記憶回路を融合した数理モデルを構築し、大脳辺縁系の高次機能を有する知的システムを開発した。具体的には、海馬 CA3 モデル、海馬一新皮質モデル、扁桃体モデルなど複数の数理モデルの開発・融合を行い、又、カオスの遍歴などによる情動・記憶の状態遷移を制御する方式を提案することによって、情動の関与した複数の時系列パターンの相互想起及び長期記憶形成機能を持つ大脳辺縁系の数理モデルを開発することができた。本研究は提案した大脳辺縁系数理モデルの開発によって、脳全体を統一する数理システムの実現可能性を示唆した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,700,000	0	1,700,000
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	540,000	4,040,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：脳型情報処理、脳高次機能の数理モデル、カオスニューラルネットワーク、連想記憶、情動モデル、大脳辺縁系

## 1. 研究開始当初の背景

近年、非侵襲計測技術（CT、PET、fMRI など）の発展により、脳の高次機能に関する実験的な研究は飛躍的に進展している。その最新の成果は神経回路網理論や脳型情報処理システムなど多くの分野に利用されている。

記憶の計算モデルについては、古くから静

的連想記憶ネットワーク（Hopfield 1982）、動的記銘・想起カオスニューラルネットワーク（Aihara 1990, Adachi & Aihara 1997, Tsuda 1994, Kunishibe ら 1996）及び多くの海馬モデル（Sperling 1960, 森田 1989, Rolls 1995, Araki & Aihara 1998, Ito ら 1998）が提案されている。特に最近では、記憶形成に重要な役割を持つ CA3 に関して、横

山と堀口は自己想起と相互想起を同時に実現できる 3 層ニューラルネットワークを提案しており (横山, 堀口 2003)、本研究代表者らは多層カオスニューラルネットワーク (MCNN) を伊藤らの長期記憶形成モデル (伊藤真, 他 2000) に導入し、時系列パターンの相互想起が実現できる海馬—新皮質記憶回路モデルの開発を試みた (Kuremoto ら 2005)。一方、これまで、ヒトの感情に関する研究は心理学において盛んであり、circumplex model (Ressell 1980, Larsen & Diener 1992) と情動の立体モデル (Plutchik 1980) はよく知られている。また、神経解剖学において、海馬—脳弓—乳頭体—視床前核—帯状回—海馬という Papez の情動回路 (Papez 1937) が提唱されている。しかし、計算理論と神経回路網モデル分野においては、先に述べたような連想記憶モデルや、記憶形成モデルが多く提案されているものの、情動—記憶など複数のモジュールを融合した大脳辺縁系の数理モデルに関する研究は未だに少ない。最近、扁桃体の活動が注目され、扁桃体—海馬神経回路の情報伝達過程が明らかになりつつある (Kajiwara ら 2003)。そこで、本研究では、情動の評価・誘因要素を含む新たな記憶回路の力学系モデルを構築しようと考えた。

## 2. 研究の目的

情動の評価・誘因要素と動的記憶回路を融合した数理モデルを構築し、大脳辺縁系の高次機能を有する知的システムを開発する。具体的には、

(1) 海馬—扁桃体モデルの構築。これまで我々が開発した多層カオスニューラルネットワークは時系列パターンの相互想起機能を実現し、海馬モデルへ導入したが、記憶容量、想起率において改善の余地があると見られる。情動の評価と誘因を考慮し、本研究では従来の記録・想起能力が高まった海馬—扁桃体の数理モデルを構築する。

(2) 大脳辺縁系の数理モデルの開発。先述の (1) で構築した海馬—扁桃体モデルを用いて、これまで我々が伊藤モデル (伊藤ら 2000) に基づいて開発した動的想起及び長期記憶ができる神経回路モデル (海馬—新皮質モデル, Kuremoto ら 2005) と融合し、新皮質—海馬—扁桃体モデルをベースとする大脳辺縁系の数理モデルを開発する。この大脳辺縁系モデルはより高い動的連想記憶・長期記憶形成能力を持つ。

(3) 提案した数理モデルをペット型自律移動ロボットに搭載する。視覚情報、音声情報を取り入れ、実環境においてロボット間、人間—ロボット間の相互作用により、感情・感性を持つロボットを作り上げることによって、提案モデルの工学的応用を図る。

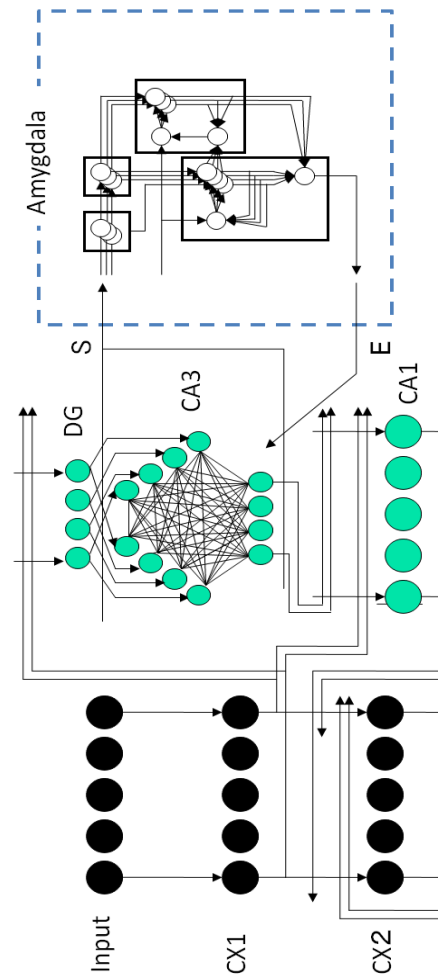


図 1 本研究で提案された大脳辺縁系モデルの構成 (Kuremoto ら, AROB 2008 論文集; Kuremoto ら, Artificial Life and Robotics, 2009; 呉本ら, 第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2009; Kuremoto ら, BI 2009 (投稿中))。外部入力は、新皮質の CX1, CX2 を経て、歯状回 (DG) でコーディングされ、海馬 CA3 層で記録・連想の処理が行われる。記録・処理過程においては、情動モデルである扁桃体モデル (Amygdala) が関与し、より速い記録、より正確な想起を起す。記録・想起の結果は海馬 CA1 層でデコーディングされ、新皮質の CX2 層で長期記憶が形成される。

## 3. 研究の方法

情動反応機能を有する扁桃体モデル (Balkenius & Moren 2000, Moren & Balkenius 2000) を改良し、それを用いて、これまで本研究グループが提案した「複層カオスニューラルネットワーク (MCNN) を海馬 CA3 モデルとして、海馬—新皮質モデルに組み込み、長期記憶機能をもつ動的記憶システム」に対して、従来の閾値によるカオス非カオス状態制御方式の代わりに、感情モデルによる複層カオスニューラルネットワーク

の動的連想の制御を実現する。すなわち、これまでの静的連想記憶ネットワーク (Hopfield 1981)、動的連想記憶機能を持つカオスニューラルネットワーク (Aihara 1990, Adachi & Aihara 1997)、嫌悪性を持つ扁桃体モデル (Balkenius & Moren 2000, Moren & Balkenius 2000)、長期記憶形成機能を持つ海馬-連合野モデル (Ito ら 2000) 及び複数時系列パターンの相互想起と長期記憶形成機能を持つ海馬-新皮質モデル (Kuremoto ら 2005) といった5つの機能モデルを融合し、動的連想記憶・長期記憶形成のより高い能力を持つ扁桃体-海馬-新皮質といった大脳辺縁系ネットワークを開発する。また、脳型情報処理方式を用いた機械学習理論及びパートナーロボットへの応用を図る。

#### 4. 研究成果

本研究は平成 18 年度 (2006 年度) から平成 20 年度 (2008 年度) まで行われ、各年度の研究成果は以下の通りである。

(1) 平成 18 年度においては、

① 情動の評価を導入した海馬-新皮質モデルの開発。多層カオスニューラルネットワーク (MCNN) を用いた海馬 CA3 モデルを海馬-新皮質モデルに導入された後、エージェントの主観的行動が環境によって評価され、その評価結果は情動の変化をもたらし、記憶と情動が連結された動的記憶システムを開発した (Kuremoto ら, Trends in Neural Computation, Springer, 2006; 大田ら, 計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 2006)。

② 記憶層を持つ自己組織化マップモデルの開発とその応用。Kohonen の自己組織化マップ (SOM) に複数の階層を導入し、入力のパター分類、確率的な政策による行動学習及び入力パターンと出力パターンの対応関係を記憶する機能をそれぞれ実現した。提案した Transient-SOM をペットロボットの手の形状による命令学習システムに導入して、その工学的な応用を試みた (Kuremoto ら, ICNC '06-FSKD' 06 論文集, 2006)。

③ 動的連想記憶モデル性能に関する検討。カオスニューラルネットワークにおけるニューロンの活性化関数と連想記憶モデルの記憶容量・想起能力の関係を考察した (大林ら, 電気学会論文誌 C, 2006; 同, 2008; 矢野ら, 計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 2006; 同, 2007; Obayashi ら, AROB 2008 論文集)。

(2) 平成 19 年度においては、

① 情動モデルを海馬-新皮質モデルに導入し、情動評価による記憶・学習プロセスの制御方式を提案した。海馬-新皮質-扁桃体といった大脳辺縁系システムを構築し、従来の

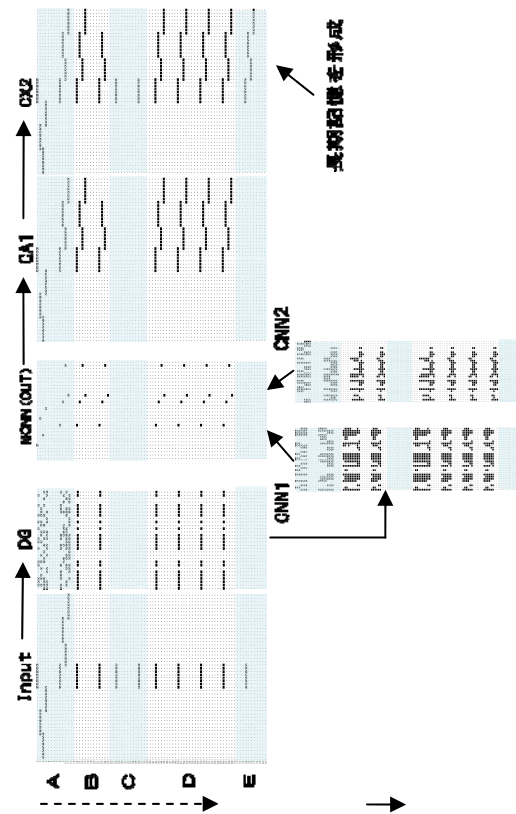


図 2 大脳辺縁系モデルの処理の流れ (呉本ら, 第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2009; Kuremoto ら, BI 2009 (投稿中)). ABCDE のような時間順で、図 1 に示された各機能モデルの内部状態の変化が確認できる (図中の白点と黒点はそれぞれ未発火と発火ニューロンを表示する)。

動的記憶システムを改善した (大田ら, 計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 2007; Kuremoto ら, AROB 2008 論文集)。

② 昨年度提案した特徴識別層、行動学習層、感情形成層および記憶層といった複数の階層をもつ自己組織化マップモデル Transient-SOM をペットロボット (AIBO) に実装し、室内蛍光灯照明条件で手の形状による命令学習システムを開発し、提案システムの工学的な応用を試みた (羽野ら, 計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 2007)。

③ 強化学習方式について、その理論と応用研究を行い、新たな学習システムや制御システム、時系列予測システムを開発した (Kuremoto ら, ICCAS 2007 論文集; Kobayashi ら, ICCAS 2007 論文集; Kuremoto ら, ISF 2007 資料)。

(3) 平成 20 年度においては、

① 海馬 CA3 モデル、海馬-新皮質モデル、扁桃体モデルに対して、それらの機能モデル間の融合と発展を行い、情動の評価・誘因と動的記憶を共に有する大脳辺縁系システム

を完成した(呉本ら, 第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2009; Kuremoto ら, BI 2009 (投稿中))。

② 情動反応機能を有する扁桃体モデルを改良し、それを用いて、前年度までに開発した「複層カオスニューラルネットワーク (MCNN) を海馬 CA3 モデルとして、海馬-新皮質モデルに組み込み、長期記憶機能をもつ動的記憶システム」に対して、従来の閾値によるカオス-非カオス状態制御方式の代わりに、情動モデルによる複層カオスニューラルネットワークの動的連想の制御を実現した (Kuremoto ら, AROB 2008 論文集)。

③ 扁桃体-海馬-新皮質モデルをベースとした大脳辺縁系ネットワークを完成し、その性能及び入出力に応じる内部状態の変化、パラメーター設定の影響などについて、詳細に考察した (Kuremoto ら, Artificial Life and Robotics, 2009; 呉本ら自律分散システム・シンポジウム資料 2009)。

④ 脳型情報処理方式を用いた機械学習理論及び群ロボットへの応用などについて新たな成果を得た (Kuremoto ら, WCCI/IJCNN 2008 論文集; Kuremoto ら, LNCS 2008 論文集; Kuremoto ら, International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2009 (印刷中); Kobayashi ら, Machine Learning, I-Tech, 2009 (印刷中), Kuremoto ら, CISP 2009 (投稿中))。

⑤ 従来の自己組織化マップを用いた命令学習システム (T-SOM) をさらに改良し、新たなパラメーターの設定法 (PL-T-SOM, PL-G-SOM) を提案し、パートナーロボットのための音声命令学習システムを開発した (古本ら, 第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2009; Kuremoto ら, CISP '09 (投稿中))。

まとめとして、本研究は静的連想記憶モデル (Hopfield モデル)、動的連想記憶モデル (Adachi & Aihara モデル)、情動モデル (Moren & Balkenius モデル)、海馬-連合野モデル (Ito らモデル)、海馬-新皮質モデル (Kuremoto らモデル) を融合し、静的・動的連想記憶の制御及び長期記憶の形成機能を有する大脳辺縁系の数理モデルを開発した。図 1 は本研究で提案した大脳辺縁系モデルの構成を示す。図 2 は二つの時系列パターンが新皮質から入力し、歯状回でコーディングされ、海馬内部で記録・想起が行われ、新皮質へ長期記憶に転換される処理の過程及び結果の一部を示している。また、本研究では、パターン認識機能を持つ Kohonen の自己組織化マップ (SOM)、非線形近似能力の高い階層型ニューラルネットワーク (MLP など) (波多ら, 第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2009; )、システム同定やカオス時系列予測のできるニューロファジィシステ

ム及び大脳基底核に存在する報酬系ニューロンをモデルとした強化学習システム (Kuremoto ら, ISF 2007 資料; Kuremoto ら, Reinforcement Learning: Theory and Application, I-Tech, 2008;) などについても性能の改善や工学的な応用を行ったが、これらの脳型情報処理モデルの融合は今後の課題となる。本研究は提案した大脳辺縁系数理モデルの開発によって、脳全体を統一する数理システムの実現可能性を示唆した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 25 件)

① Kuremoto T., Obayashi M., and Kobayashi K.: Adaptive Swarm Behavior Acquisition by a Neuro-Fuzzy System and Reinforcement Learning Algorithm, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetic* (印刷中)

② 溝上裕之, 小林邦和, 呉本堯, 大林正直: TD 誤差に基づく強化学習のメタパラメータ学習法, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 9, 2009 (印刷中)

③ 小林邦和, 大林正直, 呉本堯: 局所線形モデルを導入したウェーブレットニューラルネットワークのベイズ的設計法, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 7, 2009 (印刷中)

④ T. Kuremoto, T. Ohta, K. Kobayashi, M. Obayashi: A Dynamically Associative Memory System by Adopting Amygdala Model, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 13, No. 2, pp. 478-482, 2009

⑤ K. Kobayashi, M. Obayashi and T. Kuremoto: A Bayesian Local Linear Wavelet Neural Network, Springer-Verlag, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5507, pp. 147-154, 2009

⑥ M. Obayashi, N. Nakahara, T. Kuremoto, K. Kobayashi: A Robust Reinforcement Learning Using Concept of Slide Mode Control, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 13, No. 2, pp. 526-530, 2009

⑦ N. Kogawa, M. Obayashi, K. Kobayashi, T. Kuremoto: A Reinforcement Learning Method Based on Immune Network Adapted to Semi Markov Decision Process, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 13, No. 2, pp. 538-542, 2009

⑧ T. Kuremoto, T. Ohta, K. Kobayashi, M. Obayashi: A Dynamically Associative Memory System by Adopting Amygdala Model. *Proceedings of the 13th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2008)*, pp. 563-566, 2008

- ⑨ Kuremoto T., Obayashi M., Kobayashi K., Adachi H., Yoneda K.: A Neuro-Fuzzy Learning System for Adaptive Swarm Behaviors Dealing with Continuous State Space, Springer-Verlag, *Lecture Notes in Computer Science (ICIC 2008)*, Vol. 5227, pp. 675-683, 2008
- ⑩ M. Obayashi, K. Narita, T. Kuremoto, K. Kobayashi: A Reinforcement Learning System with Chaotic Neural Networks-Based Adaptive Hierarchical Memory Structure for Autonomous Robots, *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems 2008 (ICCAS 2008)*, pp. 69-74, 2008
- ⑪ M. Obayashi, T. Kuremoto, K. Kobayashi: A Self-Organized Fuzzy-Neuro Reinforcement Learning System for Continuous State Space for Autonomous Robots, *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation 2008 (CIMCA08)*, pp. 552-559, 2008
- ⑫ Kogawa N., Obayashi M., Kobayashi K., and Kuremoto T.: A Reinforcement Learning Method Based on Immune Network Adapted to Semi Markov Decision Process. *Proceedings of the 13th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2008)*, pp. 63-66, 2008
- ⑬ Obayashi M., Nakahara N., Kobayashi K., and Kuremoto T.: A Robust Reinforcement Learning Using Concept of Sliding Mode Control. *Proceedings of the 13th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2008)*, pp. 547-550, 2008
- ⑭ Obayashi, M., Yano, Y., Kobayashi, K., and Kuremoto, T.: Chaotic Dynamical Associative Memory Model Using Supervised Learning. *Proceedings of the 13th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2008)*, pp. 555-558, 2008
- ⑮ Kuremoto T., Obayashi M., Kobayashi K., Adachi H., Yoneda K.: A Reinforcement Learning System for Swarm Behaviors, *Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI /IJCNN 2008)*, pp. 3710-3715, 2008
- ⑯ 小林邦和, 中野浩二, 呉本堯, 大林正直: 状態予測型強化学習システム, 電気学会論文誌C, Vol.128, No. 8, pp.1303-1311, 2008
- ⑰ 大林正直, 成田顕一郎, 小林邦和, 呉本堯: 一時的滞留機能を持つ過渡的カオス連想記憶モデル, 電気学会論文誌C, Vol. 128, No. 12, pp. 1852-1858, 2008
- ⑱ 小川長久, 大林正直, 小林邦和, 呉本堯: 免疫回路網式強化学習, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.6, pp.525-527, 2007
- ⑲ 羽野ともえ, 呉本堯, 小林邦和, 大林正直: Transient-SOM を用いた手画像命令学習システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 11, pp.1004-1006, 2007
- ⑳ Kobayashi K., Nakano K., Kuremoto T. and Obayashi M.: Cooperative Behavior Acquisition of Multiple Autonomous Mobile Robots by an Objective-based Reinforcement Learning System. *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007)*, pp.777-780, 2007
- ㉑ Kuremoto T., Hano T., Kobayashi K., and Obayashi M.: Robot Feeling Formation Based on Image Features. *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007)*, pp.758-761, 2007
- ㉒ Kuremoto T., Obayashi M., and Kobayashi K.: Forecasting Time Series by SOFNN with Reinforcement Learning. *Proceedings of the 27th Annual International Symposium on Forecasting (ISF 2007)*, pp.99, 2007
- ㉓ Obayashi M., Kogawa N., Toyota S., Kobayashi K., Kuremoto T.: Controller Design Based on Immune Concept and Its Application to Chaotic Control. *Proceedings of 2006 CACS Automatic Control Conference*, pp.327-331, 2006
- ㉔ 大林正直, 大宮理恵, 呉本堯, 小林邦和: カオスニューラルネットワーク連想記憶モデルにおける活性化関数の形状とその評価, 電気学会論文誌C, Vol.126, No. 11, pp. 1401-1405, 2006
- ㉕ Kuremoto T., Hano T., Kobayashi K., Obayashi M.: For Partner Robots: A Hand Instruction Learning System Using Transient-SOM. *Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Computation and the 3rd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC '06-FSKD'06)*, pp. 403-414, 2006

[学会発表] (計 37 件)

- ① 古本隆人, 呉本堯, 小林邦和, 大林正直: ”追加学習機能を持つ音声命令学習システム”, 第21回自律分散システム・シンポジウム論文集, pp.39-42, 2009年1月22日, 鳥取市とりぎん文化会館
- ② 呉本堯, 大林正直, 小林邦和: ”大脳辺縁系モデルの構築”, 第21回自律分散シ



テム・シンポジウム論文集, pp.111-116, 2009年1月22日, 鳥取市とりぎん文化会館

③ 波多聡, 吳本堯, 小林邦和, 大林正直: ” 階差時系列を用いたニューラルネットワークによる時系列予測”, 第21回自律分散システム・シンポジウム論文集, pp.135-138, 2009年1月22日, 鳥取市とりぎん文化会館

④ 溝上裕之, 小林邦和, 吳本堯, 大林正直: ” TD誤差に基づく強化学習のメタパラメータ学習”, 平成20年電気学会電子情報システム部門大会, pp. 873-878, 2008年8月20日, 公立ほこだて未来大学

⑤ 小林邦和, 大林正直, 吳本堯: ” 局所線形モデルを導入したウェブレットニューラルネットワークのベイズ的設計法”, 平成20年電気学会電子情報システム部門大会, pp. 738-743, 2008年8月20日, 公立ほこだて未来大学

⑥ 吳本堯, 大林正直, 小林邦和, 杉野元紀, 松崎洋一郎: ” 感情誘起型複数ロボットの適応行動の改善”, 電子情報通信学会総合大会2008, pp. S39-S40, 2008年3月18日, 北九州学術研究都市早稲田大学大学院情報生産システム研究科

⑦ 矢野艶江, 大林正直, 小林邦和, 吳本堯: ” 勾配法を利用した学習型連想記憶モデル”, 第16回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 88-89, 2007年11月10日, 山口大学工学部

⑧ 大田智範, 吳本堯, 小林邦和, 大林正直: ” 扁桃体-海馬モデルによる動的連想記憶システム”, 第16回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 162-163, 2007年11月10日, 山口大学工学部

⑨ 田邊朋子, 大林正直, 小林邦和, 吳本堯: ” 嗅覚機能のFreemanモデルの検証とその応用”, 第16回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 234-235, 2007年11月10日, 山口大学工学部

⑩ 矢野艶江, 大林正直, 小林邦和, 吳本堯: ” 確率的カオスダイナミクスを用いた連想記憶モデルの性能について”, 第15回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 60-61, 2006年11月18日, 岡山理科大学25号館

⑪ 大田智範, 吳本堯, 小林邦和, 大林正直: ” 情動-連想記憶システム”, 第15回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 62-63, 2006年11月18日, 岡山理科大学25号館

[図書] (計 3 件)

① Kobayashi K., Obayashi M. and Kuremoto T.: Objective-based Reinforcement Learning System for Cooperative Behavior

Acquisition, *Machine Learning, Advanced Robotic Systems, I-Tech* (印刷中)

② Kuremoto, T., Obayashi, M. and Kobayashi, K.: Neural Forecasting Systems. *Reinforcement Learning, Theory and Applications* (ed. Cornelius Weber, Mark Elshaw and Norbert Michael Mayer), *Advanced Robotic Systems*, 424 p., Chapter 1, pp.1-20, *I-Tech*, 2008

③ Kuremoto, T., Eto, T., Kobayashi, K. and Obayashi, M.: A Hippocampus-Neocortex Model for Chaotic Association. *Trends in Neural Computation (Studies in Computational Intelligence)* (ed. Ke Chen and Lipo Wang), Vol.35, 512 p., Chapter 5, pp.111-133, *Springer*, 2006

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吳本 堯 (KUREMOTO TAKASHI )  
山口大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 40294657

### (2) 研究分担者

大林 正直 (OBAYASHI MASANAO )  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 60213849

小林 邦和 (KOBAYASHI KUNIKAZU )  
山口大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 40263793